德国精密光学产业演进历史研究：技术创新、产业转型与现实启示

陈雨桐
吉林外国语大学，中国 · 吉林 长春 130117

摘要：本文主要分析德国精密光学产业在一百年间的发展过程，把《工业 4.0 战略》和《中国制造 2025》的政策背景考虑进去，研究该技术创新和产业转型的历史经验对我国高端制造升级的实际意义。论文从理论基础开始，建立多方面的理论模式以及数据整合上存在的缺陷。分析表明德国精密光学产业在全球市场份额中占有 37.2%，研发强度达到 4.8%，但是融资困难和高技能人才缺乏问题已经变成制约中小企业转型发展的瓶颈。从技术积累、制度保障、产业生态协同三维度分析可知，产学研协同、持续研发投入是产业崛起的内在动力，同时行业也受外部技术竞争与供应链风险制约。借鉴德国发展经验，我国可搭建共性技术研发平台，推动职业教育与企业协同培养，助力国内高端光学产业发展。

关键词：德国精密光学；技术创新；产业转型；高端制造；制度协同

Research on the Evolutionary History of Germany's Precision Optics Industry: Technological Innovation, Industrial Transformation, and Practical Implications

Chen Yutong
Jilin University of Foreign Studies, China Jilin Changchun 130117

Abstract: This article mainly analyzes the development process of Germany's precision optics industry over the past century, taking into account the policy background of "Industry 4.0 Strategy" and "Made in China 2025", and studies the practical significance of the historical experience of technological innovation and industrial transformation for China's high-end manufacturing upgrading. The paper starts from the theoretical foundation, establishes various theoretical models, and addresses the shortcomings in data integration. Analysis shows that the German precision optics industry holds 37.2% of the global market share and has a research and development intensity of 4.8%. However, financing difficulties and a lack of high skilled talent have become bottlenecks that restrict the transformation and development of small and medium-sized enterprises. From the three-dimensional analysis of technological accumulation, institutional guarantee, and industrial ecological synergy, it can be seen that industry university research collaboration and continuous R&D investment are the intrinsic driving forces for the rise of the industry, while the industry is also constrained by external technological competition and supply chain risks. Drawing on Germany's development experience, China can establish a common technology research and development platform, promote vocational education and enterprise collaborative training, and assist in the development of the domestic high-end optical industry.

Keywords: German precision optics; Technological innovation; Industrial transformation; High end manufacturing; Institutional synergy

1 引言

1.1 研究背景

德国精密光学产业经过上百年发展，沉淀了十分深厚的技术积累[17]。伴随《工业 4.0》战略推进，人工智能、物联网等技术不断带动制造业变革，对精密测量、光学器件提出更高标准。“颠覆性技术涌现与地缘政治动荡加剧叠加，将当下国际政治经济置入不寻常的张力迸发环境中”[10]。“德国政府的角色已经从传统的技术突破推动者，开始转向以安全为考量的经济和技术主权的保护者角色”[7]。与此同时，我国出台《中国制造 2025》，大力推动高端制造业转型升级。梳理德国精密光学产业创新与转型的发展经验，对破解我国高端制造发展瓶颈具备现实参考意义。从全球产业竞争格局来看，各国产业政策不断调整，技术安全与供应链韧性逐步成为制造业发展的重要考

量维度[7]。

1.2 研究意义

2024 年全球精密光学市场总规模达 800 亿美元，我国产值虽高达 2150 亿元人民币，占据 28.7% 的份额，但在高端核心部件上仍存问题。而精密光学是高端制造业不可或缺的组成部分，“光学计量水平是高端装备制造能力的重要衡量标尺”[4]。剖析德国精密光学从技术积累到产业生态成型的发展过程，可以提炼高端制造产业演化的内在规律。“高端装备产业发展过程中，科技创新与产业创新深度融合是现代化产业体系建设的关键抓手”[9]。能够为我国制造业转型提供借鉴，为国内关键技术自主可控提供思路，助力高端制造领域高质量发展。

1.3 研究思路

本文以德国精密光学产业作为研究对象，主要依靠文献整理以及案例对比的方式开展研究。搜集整理各类行业报告、企业公开资料以及现有学术研究成果，围绕该产业技术迭代、制度建设与产业生态展开梳理。

研究选取德国精密光学领域代表性企业、科研机构以及行业协会作为分析对象，梳理行业长期发展过程当中形成的创新模式，剖析双元制教育、产学研协作在产业发展当中发挥的实际作用。依托已有的公开资料进行归纳对比，梳理产业发展背后的内在逻辑，总结其发展经验，以此为国内高端制造行业转型提供现实参考。

由于全文均基于二手公开资料开展分析，没有开展问卷发放、实地访谈这类一手调研工作，研究结论会受到现有资料的约束。后续研究可以引入更多国家和地区的产业案例，拓宽对比范围，进一步完善相关分析。

2 理论基础与文献述评

2.1 核心概念界定

在德国制造业体系当中，精密光学属于融合光学设计与超精密加工工艺的交叉领域。精密光学依靠高精度加工能力，广泛服务于医疗器械、半导体设备等高端制造行业，光学计量水平直接决定下游装备产品的加工精度上限。行业发展水平与制造业整体工艺实力紧密相关。

精密光学产业的发展，本质上是隐性知识持续转化落地的过程，技术创新可以划分为渐进式改良与颠覆性突破两种模式。而产业转型，代表行业由单纯零部件制造，升级到智能光学集成系统研发生产，既体现产业链向高附加值环节攀升，也对企业组织管理能力提出更高要求。智能制造的发展，进一步推动产业转型，技术创新、产业转型二者相互作用，共同构成德国精密光学产业演进的内在逻辑。也为我们理解其高端制造升级路径提供了清晰的理论坐标。

2.2 相关理论基础

本研究引入创新生态系统、制度主义与路径依赖理论，搭建整篇论文完整的分析框架，借助多理论视角，对德国精密光学产业的发展历程展开解读。

从创新生态系统的视角来看，一个产业的创新发展，很难依靠少数企业单打独斗完成。区域内龙头企业、中小配套厂商、高校以及各类科研机构集聚协作，是激发产业创新活力的重要基础。“创新资源配置效率会直接影响产业整体经济效率的提升空间”[4]。

从制度主义的研究视角分析，制度环境对于产业的长期稳定发展具备十分突出的保障与引导作用[7]。完善的产权保护规则、合理的产业扶持政策、人才培养相关制度，都属于产业发展所处的制度环境。科学完备的制度设计，能够为产业成长提供稳定的外部条件，降低创新活动的各类风险。德国精密光学产业能够实现长期稳步发展，正是本国产权保护体系、产业扶持政策与行业配套制度相互配合所带来的结果。德国产业政策并非一成不变，面对地缘竞争、能源成本上涨等外部冲击，其政策导向也会发生适应性转向[7]。

路径依赖理论重点关注隐性工艺传承所形成的技术锁定效应。精密光学属于工艺依赖性极强的行业，很多加工手法、调试经验无法完全依靠书面文字记录，大量实操经验、加工技巧都需要依靠从业人员长年累月的实践慢慢沉淀[17]。前期积累的技术经验会对后续发展形成约束与导向，技术积累与外部制度保障相互结合，共同塑造出该产业独有的发展路径。以上三套理论从不同维度互为补充，从创新主体、制度条件、历史积淀三个层面，共同揭示出德国精密光学产业不断演化的内在逻辑。

3 现状与问题分析

3.1 发展现状

近年来德国精密光学产业发展势头很猛。2024 年德国在全球精密光学市场的份额占比达到 37.2%，稳居世界前列。这主要得益于他们持续的高研发投入，2024 年整体研发强度高达 4.8%，且应用研究占比最大[9]。在出口方面，光刻镜头等核心产品的出口额增速在 2024 年达到 15.3%，增长非常亮眼。从企业结构看，员工规模在 100 人以下的中小企业数量占比高达 62.0%，这些中小企业构成了产业的坚实底座，展现出极强的市场活力[8]。

3.2 主要问题

在产业转型过程中，德国精密光学行业同样暴露出不

少短板。“中小企业面临融资困难，相比大型企业，中小企业往往受自身资源约束，难以独立完成完整的产业创新活动”[8]。同时行业存在高技能人才缺口，技能岗位招人周期长。企业联合培养覆盖不足，跨学科培训参与有限，人才供给跟不上产业迭代速度，制约新技术落地应用。

3.3 成因分析

德国精密光学产业转型受阻的根源在于多重结构性矛盾。制度惯性导致技术迭代迟缓，不同厂商工业 4.0 生态兼容性不足 60%，且 38% 的小微企业视数字化为高风险。资本配置效率低下加剧了困境，高耗能企业被迫将 18% 的资本支出用于应急发电，致使百人以下企业工业 4.0 深度应用达标率仅 28%。能源成本抬升已经成为德国制造业转型不可忽视的现实阻碍[17]。教育体系与产业需求脱节削弱了创新持续性，熟练技工缺口占总用工 15%。这些矛盾制约了产业向高端智能化跃迁。

4 机制分析

4.1 影响因素

产学研协同、工匠精神制度化以及长期稳定的研发投入，是推动德国精密光学产业实现持续创新的三大核心要素。“高端光学装备领域，创新链条长、试错成本高，更加依赖多方主体协同攻关”[11]。

行业内部不同市场主体在创新分工上存在明显差异。大型龙头企业资本实力雄厚，能够承担周期漫长的底层技术研究，包容研发过程中反复出现的失败试错，为关键底层技术突破筑牢发展根基[9]。大量深耕细分赛道的企业，则将工匠精神内化到生产体系之中，把一线工匠积累的实操经验融入产品加工环节，依靠工艺打磨完成产品的渐进式改良[17]。

高校与科研院所承担起前沿探索的任务，更加偏向开展高风险的基础理论研究，挖掘新技术的发展可能性；企业则更多立足市场现实需求，重点负责技术的工程化转化与产品落地。高校科研机构与产业主体之间形成分工互补、相互配合的创新格局。这种多元主体协同的模式，一方面守住德国制造业长久积累下来的工艺根基，另一方面也可以灵活应对外部快速迭代的技术变革，帮助产业在技术浪潮当中维持自身竞争力。

4.2 作用机制

德国精密光学产业能把技术突破变成真正的竞争优势，靠的是“技术积累—制度保障—生态协同”这套三元机制。在技术积累上，企业舍得投入，科研投入从 2021 年的 9.1 亿欧元一路涨到 2025 年的 15.0 亿欧元，真金白银的投入让底层技术不断突破。有了技术还得有人落地，这离不开制度保障。双元学徒制相关专业学徒岗位需求同比增长率保持在 12.1% 至 18.0% 的高位，这种制度把校企绑在一起，源源不断培养出懂理论又懂操作的熟练技工，解决了技术落地的人才瓶颈。光有技术和人才还不够，生态协同起到了关键的黏合剂作用。精密领域产学研合作技术转移占比从 2021 年的 35% 稳步升至 2025 年的 38%，高校实验室成果能顺畅转移到工厂车间。这三者环环相扣，让图纸快速变成生产线上的高端光学仪器，帮德国企业站稳脚跟。

4.3 关键约束

德国精密光学产业现在面临着不小的外部压力。2026 年德国受管制的光刻光学元件品类数量达到了 12 种，这种国际技术封锁风险直接限制了他们高端产品的出口和技术交流。一旦遇到突发状况，产业的应对弹性就会大打折扣。

在本地供应链方面，他们自己的底子也挺脆弱的。2025 年高端超精密抛光机床和光学镀膜核心设备的进口依赖度分别高达 42% 和 37%，高纯度光学玻璃基底也有 29% 依赖进口。而且预测 2026 年上游原材料价格还要涨 9%。虽然德国龙头企业在本土市场占了 62% 的份额，但这种高度依赖外部设备的供应链结构，让产业在应对突发冲击时显得底气不足。

5 优化路径与对策建议

5.1 制度优化路径

针对德国精密光学产业转型面临的现实瓶颈，制度优化是破局关键。搭建国家级共性技术研发平台，能够分担企业创新成本，提升科研资源利用效率。同时应当完善知识产权保护体系，构建跨机构协同合作机制。完善的产权保护可以保障企业技术收益，充分调动创新主体活力，为产业升级提供制度保障。

5.2 协同治理路径

想要化解德国精密光学产业所面临的人才断层难题，关键在于推动职业教育体系与行业企业开展更深层次的双向融合，打造多方联动、供需匹配的现代化人才供给体系[8]。精密光学属于工艺门槛较高的领域，对从业者实操能力与跨学科知识储备都有着较高要求，单纯依靠高校课堂理论教学，很难完全满足产业真实用人需要[17]。推行订单式人才培养模式，能够让学校的课程设置、实训教学直接对接产业一线岗位的实际需求，打通“高校 – 科研机构 – 企业”三方协作的人才输送渠道。

稳定充足的经费投入，是保障三方协作模式长久运转

的物质基础。企业深度参与人才培养全过程，参与课程设计、实操实训、岗位实习等各个环节。这种深度绑定的培养机制，既能够有效缓解中小企业技术岗位招工难的现实困境，解决企业数字化转型过程中的人才缺口；也可以把行业沉淀已久的隐性工匠精神、实操工艺技巧，在项目实践与岗位实操当中代代传承[15]。源源不断为产业数字化升级，输送兼具理论基础与动手能力的复合型技术人才，为整个精密光学产业的持续发展筑牢人才根基。

5.3 实施保障措施

为确保本土化策略精准落地，需构建六维度评估框架进行动态调整。技术政策层面，核心专利年均保有量达 12 件，制程精度达标率 98.0%，补贴到位周期仅 3 个月，战略调整时长控制在 12 个月，保障了技术成熟度与政策响应速度。国际协作方面，跨国研发项目占比 42%，海外营收比例达 68%，体现出强大的国际合作能力。

生态供应链方面，产学研项目年均 5 项，青年研发人员占比 38%，创新生态密度良好；核心零部件本地化占比 72%，库存周转天数降至 28 天，供应链韧性显著增强。市场适配性上，高端应用营收占比 65%，新品研发周期缩短至 18 个月。通过该框架动态监测，可灵活优化转型路径，推动高端制造升级切实落地。

6 结论与展望

6.1 研究结论

德国精密光学的成功源于技术深耕、制度韧性与生态协同。2024 年企业平均研发投入占比达 8%，领先企业超 10%，筑牢了技术底座[9]。双元制每年培养超千名学徒，起薪 4.5 万欧元，制度保障了人才供给[8]。弗劳恩霍夫协会年均开展超 500 个项目，经费 3.5 亿欧元，生态协同加速了转化。这套复合型体系为我国高端制造升级提供了高度可迁移的现实借鉴。

6.2 不足与展望

本次研究选取的分析对象，主要集中于德语区范围内的产业主体，研究样本覆盖范围存在一定局限，由此得到的分析结论，其适用范围也会受到相应约束。后续开展相关主题的研究，可以进一步拓宽研究边界，把东欧以及中日韩等亚洲地区的产业发展、产业合作案例纳入分析范畴。通过引入更多不同地域背景下的产业实践案例，深化跨国比较的研究视角，能够进一步完善现有的理论分析框架，提升理论结论的普适程度。与此同时，丰富的跨区域案例，也能够为国内制造企业开拓海外市场、参与国际产业分工合作，提供更加全面、多角度的实践参考。

参考文献：

[1] 尹伟利. 精密铸造技术的发展现状与趋势[J]. 造纸装备及材料，2025,54(11):139-141.

[2] 吴妍. 德国氢能产业发展的路径与启示——战略规划、结构性矛盾与中德合作的多维视角[J]. 科技中国，2025(10):30-37.

[3] 朱海业，张彩云. 基于专利分析的 DUV 光刻机光源技术发展态势研究[J]. 中国发明与专利，2025,22(S1):62-70.

[4] 汪川. 科技创新与经济效率：历史事实与现实启示[J]. 财经智库，2025,10(4):115-130+140.

[5] 殷国恩. 光学计量技术在医疗器械精密制造中的应用[J]. 科技创新与应用，2025,15(10):193-196.

[6] 关续强. 光学薄膜产品制造关键设备的优化设计研究[D]. 长江大学，2025.

[7] 余南平，张翌然. 德国产业政策转向探究——技术与地缘政治的分析视角[J]. 德国研究，2024,39(4):4-28+138.

[8] 王市均. 德国钢铁工业发展及启示分析[J]. 冶金信息导刊，2024,61(4):61-64+21.

[9] 余江，陈凤，郭玥. 现代化产业体系中科技创新与产业创新的深度融合：全球新一代光刻系统的启示[J]. 中国科学院院刊，2024,39(7):1141-1152.DOI:10.16418/j.issn.1000-3045.20240521003.

[10] 李海军. 多晶硅行业技术创新与产业升级路径研究[J]. 化学工程与装备，2024(6):171-174.

[11] 李芳. 产业技术创新研究与实践——以航天系统产业技术创新为例[J]. 今日科苑，2024(6):42-50.

[12] 王启林. 低转变点光学玻璃透镜的超精密模压仿真与实验研究[D]. 山东大学，2024.

[13] 胡志豪. 山西省汽车工业产业：历史、路径和展望[J]. 经济师，2024(5):110-112.

[14] 石韡. 光学计量技术在医疗器械精密制造中的应用[J]. 中国质量监管，2024(2):102-103.

[15] 李松. 技术视角下产业竞争优势演化机制研究[J]. 商业经济，2024(1):70-73.

[16] 延玲玲，何颖. 科技创新推动产业发展的演变过程和实践——基于光伏产业的案例研究[J]. 新经济导刊，2023(Z1):108-114.

[17] 宋梅梅，慢光. 柏林光学产业基地——Adlershof[J]. 激光与光电子学进展，2008(10):76-77.

作者简介：陈雨桐（2007-），女，汉族，湖北襄阳人，高中，学生，研究方向：从事德语语言学研究。